

## **Effet de l'endommagement transverse sur la résistance en compression sens fibre d'un composite carbone/époxy**

### ***Effect of transverse damage on the compressive strength in fiber direction of carbon fiber reinforced epoxy materials***

**G. Eyer<sup>1</sup>, O. Montagnier<sup>1,2</sup>, J-P. Charles<sup>1,3</sup>, Ch. Hochard<sup>1</sup>**

1 : Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA),  
31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France  
e-mail : [eyer@lma.cnrs-mrs.fr](mailto:eyer@lma.cnrs-mrs.fr), [hochard@lma.cnrs-mrs.fr](mailto:hochard@lma.cnrs-mrs.fr)

2 : Centre de recherche de l'Armée de l'air (CReA), École d'Officiers de l'Armée de l'air (EOAA),  
BA 701, 13361 Salon Air, France  
e-mail : [olivier.montagnier@inet.air.defense.gouv.fr](mailto:olivier.montagnier@inet.air.defense.gouv.fr)

3 : Eurocopter, 13725 Marignagne Cedex, France  
e-mail : [jean-paul.charles@eurocopter.com](mailto:jean-paul.charles@eurocopter.com)

### **Résumé**

L'étude expérimentale proposée analyse l'influence de l'endommagement transverse sur la résistance en compression sens fibre pour des composites tissés carbone/époxy. Afin d'explorer plusieurs méthodes expérimentales, l'étude porte d'abord sur des essais de flexion pure où le comportement dans la zone comprimée est exploré pour des éprouvettes saines. Ensuite un essai de compression pure sur des tubes préalablement endommagés en torsion est proposée. Les essais sont suivis par corrélation d'image afin de déterminer les effets de structure nuisant à la caractérisation du matériau. On montrera finalement que l'endommagement transverse influence la tenue mécanique en compression.

### **Abstract**

The influence of transverse damage on compressive strength in fiber direction for woven carbon fiber reinforced epoxy materials is investigated by an experimental approach. Several experimental methods are proposed. The first study focuses on a pure bending test where the behavior in the compression zone is investigated. Then damaged tubes in torsion are studied in pure compression test. The tests are followed by image correlation to analyze structure effects affecting the material characterization. We finally show that the transverse damage affects the mechanical performance in compression.

**Mots Clés : résistance, compression, endommagement, composites**

**Keywords : strength, compression, damage, composites**

## **1. Introduction**

Le dimensionnement des structures composites passe par des modèles numériques toujours plus complexes dont la qualité découle de la capacité à reproduire le comportement du matériau. Pour les composites stratifiés, le comportement en compression dans la direction des fibres s'avère complexe et reste encore mal connu. Une des principales difficultés pour ce type de sollicitation est le lien entre la partie expérimentale, la mise en place des modèles et leur validation. Les sollicitations de compression entraînent inévitablement des effets de structure qui empêchent de conclure quant au comportement du matériau.

Il a déjà été montré pour des sollicitations de traction que l'augmentation de l'endommagement transverse avait pour conséquence de diminuer la résistance du pli [1]. Il est pressenti que l'endommagement joue un rôle d'autant plus important pour la compression. Lorsque la résine est intégralement endommagée, l'élancement des fibres mène à leur flambage immédiat, ce qui implique une rupture catastrophique du pli. Il a été montré [2] que l'augmentation de la température (ce qui s'apparente à un endommagement de la matrice) entraînait une chute de la résistance en

compression pour des composites verre/polypropylène. Et lorsque la température atteint le seuil de transition vitreuse, le pli présente une résistance quasi-nulle.

Nombre de modèles micros visent à décrire la rupture du pli en compression, notamment *via* l'introduction des modèles à bandes de glissement (kink-band) [3]. Ces modélisations se complètent avec la mécanique de l'endommagement [4-5]. Il reste cependant difficile d'évaluer la qualité de ces modèles puisque les expérimentations sont peu nombreuses.

C'est dans ce cadre que nous proposons une étude expérimentale qui met en évidence le rôle de l'endommagement transverse dans la rupture en compression sens fibre pour des plis tissés carbone/époxy.

Le choix d'un type d'essai n'est pas anodin et mène à la réflexion. Le montage prévu par la norme (ASTM D 3410/A et EN ISO 14126) est l'essai Celanese qui est utilisé dans de nombreuses publications [6-7-8]. L'avantage principal de cet essai est la géométrie particulièrement simple. Cependant les résultats présentent une variabilité importante notamment du fait d'une structure qui est très propice au flambage et qui possède une concentration de contrainte importante au niveau de l'encastrement [7]. Dans le but de palier à ces défauts, certaines équipes tentent de modifier la géométrie de l'éprouvette [6-9-10] ou d'équiper le montage d'un dispositif externe, dit « anti-flambage » [2-11]. Malgré ces améliorations les résultats concernant la déformation à rupture restent quantitativement de qualité médiocre avec une variabilité importante.

Une autre piste pour caractériser le comportement en compression est d'étudier la face comprimée des essais de flexion, connus pour offrir une meilleure stabilité. Dans cet esprit, on retrouve les essais de flexion 3 points [12-13], les essais de flexion 4 points [14-15-19] et les essais de flexion pure [7]. Les essais de flexion avec points d'appuis présentent deux points négatifs :

- le calcul de l'état de contrainte à partir de l'effort nécessite un calcul inverse complexe lié au grand déplacement de l'éprouvette,
- les points d'appuis peuvent conduire à une rupture prématurée de l'éprouvette.

L'essai de flexion pure [7] a été mis en place dans le but de contourner ces difficultés. Le suivi de l'essai à moment imposé permet un passage simple du moment de flexion à la contrainte de compression. De plus, les effets de bords restent très éloignés de la zone utile de l'éprouvette, ce qui perturbe la mesure au minimum. Ce type d'essai permet d'obtenir des déformations à rupture très importantes (jusque 1,8% pour un unidirectionnel K63712).

Dans le même esprit, on retrouve les essais de flambage rotulé [9-16] qui permettent aussi d'atteindre des déformations à rupture très importantes. Le problème de ces essais est la difficulté à relier l'effort imposé à la contrainte dans la zone utile.

Le soucis auquel nous sommes confronté avec les essais s'appuyant sur la flexion est la difficulté d'endommager au préalable les éprouvettes. Malgré cela, nous utiliserons tout de même l'essai de flexion pure afin de déterminer le comportement en compression pour des éprouvettes saines. Cela permettra aussi une comparaison au niveau de l'influence des gradients de déformation [9-16].

Une étude sera ensuite réalisée à l'aide d'une machine de traction-torsion sur des tubes, dont les plis sont orientés selon l'axe de révolution. Cela permet de décomposer l'essai en deux étapes : dans un premier temps l'éprouvette est endommagée en fatigue par des cycles de torsion (ce qui correspond au cisaillement de la matrice), ensuite un essai de compression permet de déterminer la déformation à rupture.

L'instabilité des essais de compression les rend extrêmement sensibles aux effets de structure et aux imperfections, c'est pour cette raison que le suivi de la manipulation sur tubes est effectué par

corrélation d'image. La mesure du champ de déformation permet de visualiser les effets locaux qui perturbent la mesure et conduisent à une rupture précipitée de l'éprouvette.

## 2. Identification du comportement en compression sur tubes sains à partir d'un essai de flexion pure

Le matériau étudié est un tissu équilibré composé de fibres de carbone et de résine époxy. Ce composite a déjà été étudié afin d'en déduire ses caractéristiques mécaniques pour le modèle d'endommagement développé au LMA [18] (notamment en traction et en cisaillement).

Paramètres globaux pour le pli				
$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$E_{12}$	$\sigma_1^{\text{rupture}}$
56 GPa	56 GPa	0,04	3,8 GPa	800 MPa

Tab. 1. Paramètres matériau [17]

L'essai proposé consiste à analyser le comportement de compression à partir d'une éprouvette  $[0^\circ]_{4S}$  sollicitée en flexion pure dont le montage [7] est présenté fig. 1. L'identification du modèle en compression passe par la résolution d'un calcul inverse dans lequel intervient le comportement des plis en traction. Afin de limiter les erreurs de modélisation, une série d'essais de traction est mis en place afin de prendre en compte la non-linéarité en traction (rigidification). Suite à la modélisation puis la résolution, la loi de comportement en traction est déterminée par :

$$\sigma = 58200(1 + 3.6\varepsilon)\varepsilon \quad (\text{Eq. 1})$$

Il est ensuite possible d'étudier le comportement en compression en mesurant simultanément le moment de flexion et les déformation de traction et de compression au centre de l'éprouvette fig. 1. Afin d'affiner la mesure, un correctif peut être apporté afin de prendre en compte l'épaisseur du support de la jauge et du film de colle ( $e=0,04\text{mm}$ ), ce qui joue un rôle non-négligeable en flexion.

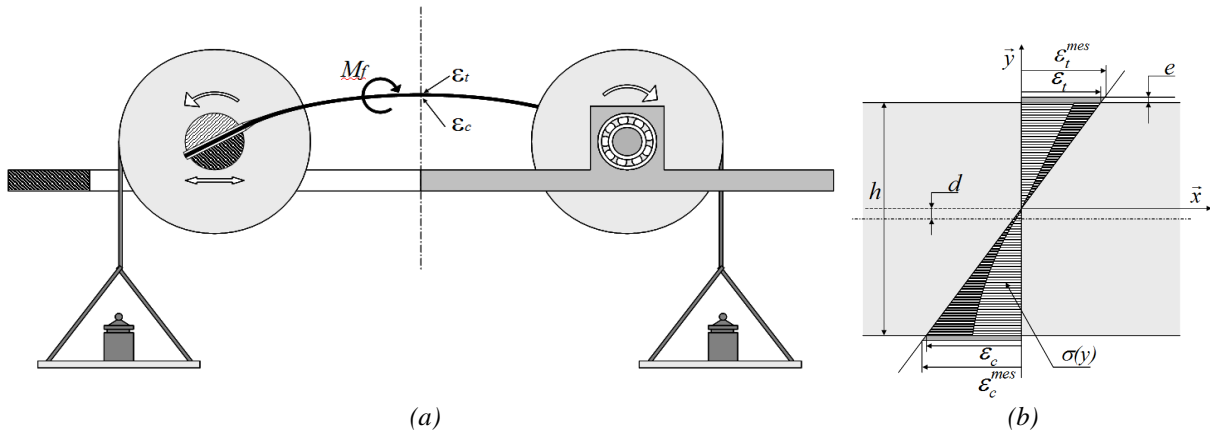


Fig. 1. Essai de flexion pure : (a) banc d'essai et (b) répartition des contraintes longitudinales dans l'épaisseur de l'éprouvette

De plus, pour comparer des éprouvettes de section différentes, une contrainte équivalente est définie à partir du moment de flexion mesuré. Cette définition n'a pas réellement de sens physique pour un comportement non-linéaire du stratifié.

$$\sigma_{\text{equiv}} = \frac{h M_f}{2 \frac{bh^3}{12}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Le modèle utilisé suppose la chute du module de compression proportionnelle à la déformation en compression [19] :

$$\sigma(y) = E_T(1 + \alpha \varepsilon(y)) \varepsilon(y) \quad (\text{Eq. 3})$$

Cette modélisation décrit le comportement à l'échelle du pli. Dans le but de déterminer les paramètres du modèle à partir des essais réalisés, une fonctionnelle à minimiser est définie comme suit :

$$f = \sum_{k=1}^n \left[ q (N_{\text{cal}}(k))^2 + (1-q) (M_{f\text{-cal}}(k) - M_{f\text{-mes}}(k))^2 \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

avec  $q \in [0, 1]$ , le facteur de pondération.

Les résultats montrent une bonne corrélation entre les courbes modélisées et les points expérimentaux. La prise en compte du comportement non linéaire en traction permet de minimiser l'erreur sur l'identification du paramètre  $\alpha$ . D'autre part, pour ce matériau tissé, il semble que ce modèle de comportement en compression présente une corrélation tout à fait suffisante (fig. 2). Notons que nous n'avons pu déterminer la déformation à rupture en compression puisque la rupture est toujours survenue dans la zone tendue. On a cependant pu déterminer que pour une déformation de 1,8% la rupture n'intervenait pas encore en compression. Afin de nous focaliser sur la rupture de la zone comprimée, il faudrait donc changer l'empilement ou la géométrie de l'éprouvette pour forcer la rupture à se produire dans la zone en compression.

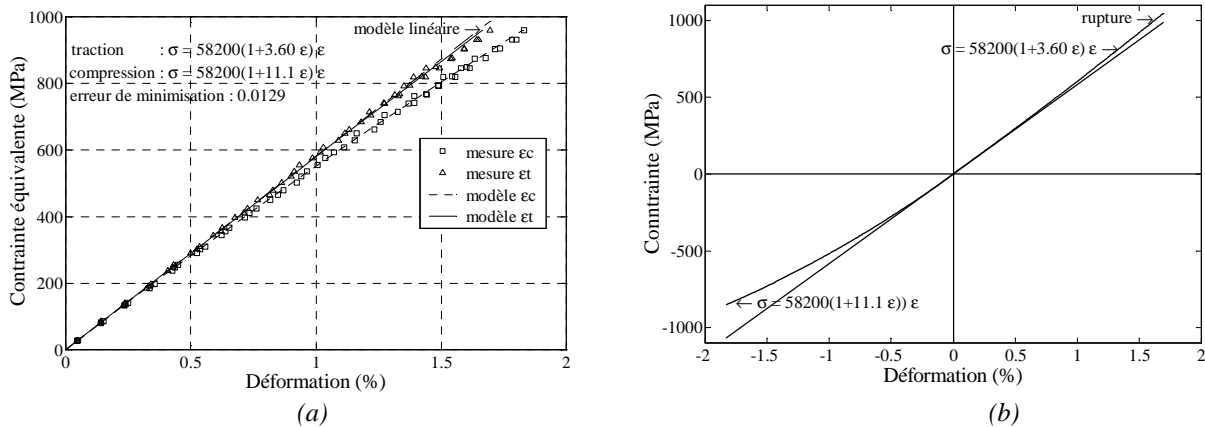


Fig. 2. Essais de flexion pure : (a) points mesurés et minimisation (b) loi de comportement non-linéaire identifiée

Cet essai semble très prometteur (variabilité faible des essais et limite à rupture importante) même s'il présente une difficulté pour endommager les éprouvette. De plus la commande à couple imposé rend le système difficile à contrôler. C'est pour cette raison que nous développons actuellement un système équivalent permettant des mesures avec commande en rotation.

### 3. Expérimentations sur tubes avec et sans endommagement

#### 3.1 Éprouvettes

L'éprouvette étudiée (fig. 3) est tubulaire et possède 3 plis dans la zone utile, disposés dans la direction de l'axe de révolution. Dans un premier temps, une éprouvette vide est réalisée. La mesure des diamètres intérieur et extérieur permet de déterminer l'épaisseur du pli et de contrôler la géométrie. Ensuite des manchons en acier sont incorporés afin de reprendre les efforts de serrage lors de la mise en place dans les mors de la machine de traction.

Enfin pour limiter le flambage, l'éprouvette est remplie de résine moussante époxy (PB250/SD5604). Les caractéristiques mécaniques sont données par le constructeur pour un process idéalisé (expansion parfaite dans un volume infini). Une mesure par compression sur des lopins de mousse a été réalisée afin de s'assurer que les caractéristiques matériaux concordent pour le process mis en œuvre au laboratoire. Avec cet essai, nous retrouvons bien la rigidité indiquée par le

constructeur ( $\sim 70\text{MPa}$ ). On réalise aussi que pour garder un comportement linéaire de la mousse (ce qui permet un calcul inverse plus simple), il ne faudra pas imposer de déformation de plus de 4%.

Une simulation numérique sous ABAQUS est proposée afin de montrer l'intérêt d'utiliser une mousse pour retarder le flambage. Le tube défini figure 3 est modélisé d'une part avec des éléments coques pour la partie stratifié et d'autre part avec des éléments volumiques pour la partie mousse époxy (les manchons en acier ne sont pas modélisés puisqu'il n'influent pas sur le résultat compte-tenu de la définition des conditions aux limites). Le contact est supposé parfait entre ces éléments. Le tableau 2 donne la charge critique de flambage et l'effort à rupture pour une éprouvette avec et sans mousse.

	Charge critique de flambage	Effort à rupture pour $\epsilon_{\text{rupture}}=1,4\%$
Éprouvette saine sans mousse	$\sim 6$ tonnes	$\sim 7$ tonnes
Éprouvette saine avec mousse	$\sim 8$ tonnes	$\sim 7$ tonnes

Tab. 2. Charges à rupture et de flambage avec et sans mousse obtenues sous ABAQUS

L'effort à rupture à 1,4% correspond à la déformation à rupture en traction. Pour un tel empilement, on ne peut pas utiliser l'éprouvette dépourvue de mousse puisque la charge critique de flambage est plus faible que la charge à rupture : cela reviendrait donc à mesurer une charge critique de flambage et non pas la rupture du matériau. Ces valeurs montrent que la mousse n'a pas d'influence au niveau de l'effort à rupture alors qu'elle retarde de 30% le flambage.

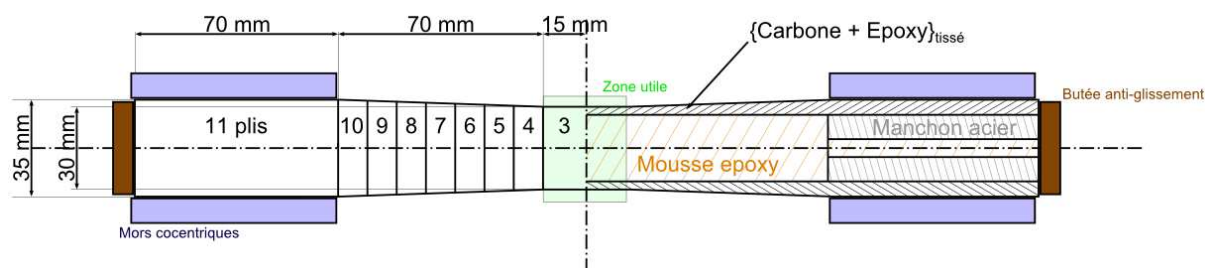


Fig. 3. Éprouvette de torsion-compression

On souhaite aussi connaître l'effet de l'endommagement sur la charge critique de flambage pour déterminer si l'essai reste valide après sollicitation en torsion. On propose donc un modèle numérique permettant de simuler à la fois l'endommagement subi par le matériau lors des cycles de torsion et l'instabilité due au flambage de la structure.

### 3.1.1. Endommagement

Le modèle basé sur la mécanique de l'endommagement utilisé est celui développé au LMA [18] qui est relativement proche de celui développé au LMT [20].

Plis (cf. fig. 3)	3	4	5	6 et 7	autres
$d_2=d_{12}$	0,36	0,13	0,07	0,05	0,01

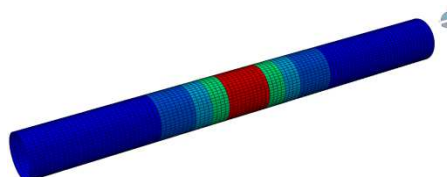


Fig. 4. État de l'endommagement dans l'éprouvette après le chargement de rotation

La structure est soumise à un chargement de torsion en imposant un encastrement et une rotation autour de l'axe de révolution. La figure 4 représente l'état de la variable d'endommagement ( $d_2=d_{12}$ ) pour une rotation de l'une des extrémité de  $11^\circ$ . Le modèle d'endommagement ainsi que les paramètres d'endommagement sont donnés dans [17]. Cette simulation permet d'observer la

répartition de l'endommagement dans les différents plis. Elle montre que l'endommagement n'est pas localisé dans la zone utile mais se développe aussi dans les empilements avec un plus grand nombre de plis. Cette carte d'endommagement (figure 4) sera le point de départ des simulations de flambage.

### 3.1.2. Flambage

La figure 5 présente l'évolution de la charge critique de flambage en fonction de l'endommagement, on voit bien ici que la baisse de rigidité favorise grandement l'apparition du flambage. Il faudra donc s'assurer que la charge critique de flambage reste toujours plus grande que l'effort à rupture afin de fournir des essais valides.

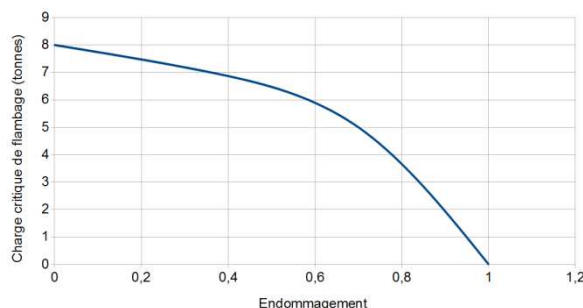


Fig. 5. Évolution de la charge critique de flambage en fonction de l'endommagement

### 3.2 Protocole de mesure

Le protocole de mesure (fig. 6) a pour but de réaliser un essai de compression pour différents états endommagés. Dans un premier temps, on impose quelques cycles de torsion (paliers de 10, 50 et 200 cycles) en angle de rotation imposé. Le suivi s'effectue par corrélation d'image mais sans enregistrement : cela revient à utiliser un extensomètre. À chaque fin de palier, on enregistre les images qui pourront ensuite être traitées afin de mesurer l'état de l'endommagement. Lorsque l'endommagement dans la zone utile correspond à la valeur recherchée, on arrête les cycles de torsion et on prépare la sollicitation de compression.

Les cycles de torsion introduisant de la plasticité, on introduit une rotation des mors de la machine jusqu'à revenir à une déformation négligeable dans la zone utile. Cette étape est suivie par corrélation d'image avec pour état de référence, une image de l'éprouvette à l'instant initial.

À partir de ce moment, il est possible de réaliser l'essai de compression en déplacement imposé (1mm/min) et prise d'images (1 image/s).

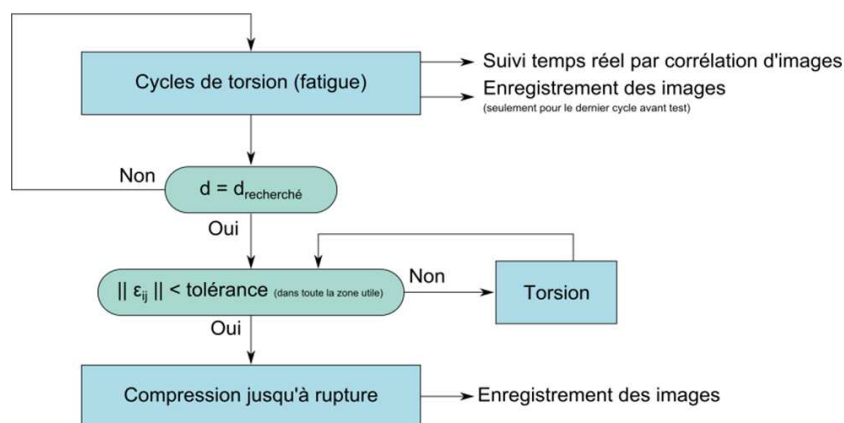


Fig. 6. Protocole de mesure

### 3.3 Résultats

#### 3.3.1. Essai de compression sur éprouvettes saines

Dans cette première partie, on expose les résultats obtenus pour des éprouvettes saines i.e non sollicitées en torsion. La courbe (fig. 7) montre clairement le caractère non-linéaire du matériau étudié ce qui semble en accord avec [7].

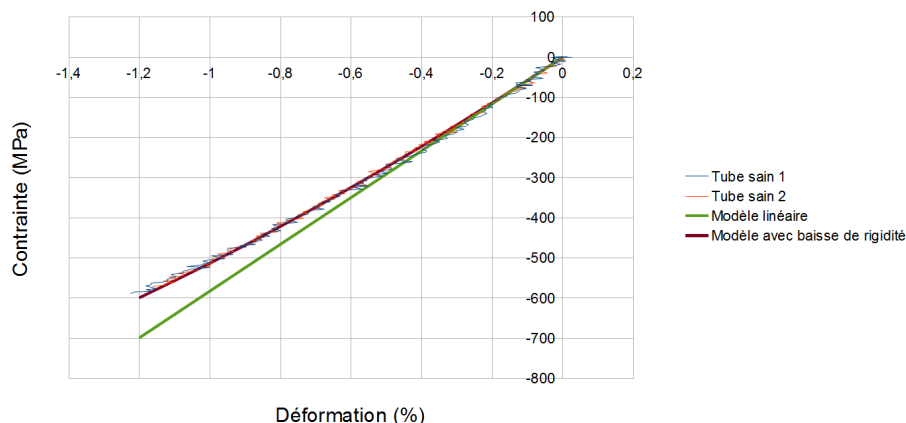


Fig. 7. Courbe contrainte-déformation pour deux éprouvettes saines

Le modèle avec baisse de rigidité utilisé est le même que celui étudié pour les essais de flexion pure (loi et coefficients identiques). Ce résultat montre que l'identification du modèle en flexion pure ne dépend pas du type de sollicitation.

Cette baisse de rigidité semble être causé par le désaxage des fibres (le comportement inverse est observé en traction : rigidification). Cela appelle à la prudence vis-à-vis de la détermination des charges critiques de flambage qui ont été surestimées compte-tenu de la diminution de la raideur du stratifié. Le même type d'essai a été réalisé sans apport de mousse. Il apparaît que la déformation à rupture est plus grande lors d'un essai avec mousse ( $\epsilon_{\text{rupture}}=1\%$  sans mousse et  $\epsilon_{\text{rupture}}=1,2\%$  avec mousse). Cela montre l'effet stabilisateur de la mousse époxy sur la structure.

Le suivi de l'essai par corrélation d'image apporte des informations sur les effets de structure mis en jeu lors de l'essai (fig. 8). On a tout d'abord un effet local lors du changement de pli qui génère une déformation longitudinale est très élevée (jusqu'à 8 fois la valeur moyenne dans la zone utile si l'on utilise des facettes de petites tailles). Ce phénomène est le fruit d'une concentration de contrainte et de la réalité du matériau. Au niveau de la fin du pli, un « amas » de résine et une disparition brutale des fibres de carbone expliquent ce phénomène. Il reste toutefois utopique de proposer une simulation dont les valeurs concorderaient parfaitement puisque la géométrie locale du défaut est inconnue.

Afin de valider ces propos, un modèle axisymétrique est proposé dans lequel la mousse epoxy, les plis composites et l'amas de résine sont présents. L'étude est réalisée pour une portion de tube prenant en compte les symétries. Les conditions aux limites sont d'une part liées aux symétries et d'autre part liées au déplacement imposé par la machine de traction (on choisit arbitrairement la valeur de 1 mm à l'extrémité du 2<sup>ème</sup> changement de pli puisque le calcul est élastique).

On peut donc visualiser le fait que la déformation dans la direction du tube n'est pas du tout homogène au voisinage du changement de pli, ce qui se constate aussi expérimentalement. On remarque notamment que la compression de l'amas de résine (dont la géométrie locale est difficile à connaître) est la source d'une déformation longitudinale très importante.

On note aussi que la diminution brutale du diamètre du tube (passage de 4 à 3 plis) génère une zone où le stratifié est en légère flexion. Cela montre que même pour un essai de compression de ce type, les effets de structure sont bien présents et peuvent entraîner la rupture prématurée du tube.

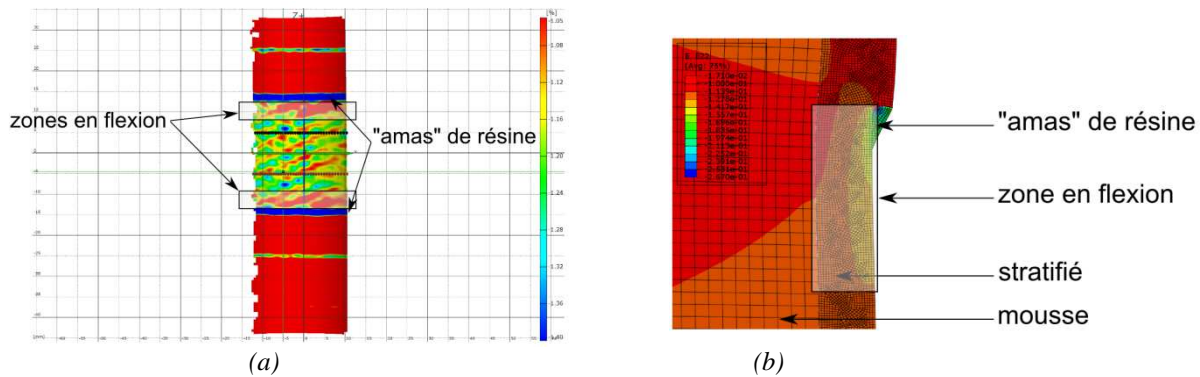


Fig. 8. Champ de déformation  $\epsilon_{yy}$  avant la rupture : (a) simulation axisymétrique (b) corrélation d'image

Dans le cas présent, il est difficile de conclure quant à la cause de la rupture du stratifié. La déformation à rupture de 1,2% ne correspond ni à la déformation à rupture pour l'essai de flexion ni à la prédiction des charges critiques de flambage. La concordance au niveau de la non-linéarité montre que le modèle de compression préalablement défini en flexion pure est fiable pour ce type de matériau. Deux solutions sont envisageables pour prédire la cause de la rupture prématurée des éprouvettes :

- La rupture est causée par le flambage qui est trop surestimé dans le calcul linéaire et ne prend pas suffisamment en compte les imperfections de l'éprouvette et la non-linéarité en compression du matériau qui précipitent la bifurcation.
- La modification du gradient de déformation dans l'éprouvette joue un rôle suffisant pour abaisser significativement la déformation à rupture [13-16].

### 3.3.2. Essai de compression sur éprouvettes endommagées

Le but ici est de comparer la déformation à rupture pour des éprouvettes saines et endommagées. Le protocole de mesure a préalablement été défini et permet d'obtenir les courbes de la figure 9. Le graphique 9.(a) présente le comportement des éprouvettes en torsion après plusieurs niveaux d'endommagement atteints par des cycles de fatigue. L'endommagement est nettement visible par la baisse de rigidité de la structure. On voit que ces courbes perdent de plus en plus de leur symétrie ce qui correspond à l'apparition de plasticité. Cela montre bien que pour un retour machine en angle  $\theta_{\text{machine}}=0$  ou en couple  $C_{\text{machine}}=0$ , les fibres dans la zone utile ne sont pas alignées dans l'axe de compression. Cela abaisserait virtuellement la résistance à rupture pour la compression [21-22-23]. C'est pour cette raison que l'on utilise la corrélation d'image afin de retrouver une déformation totale nulle dans la zone utile de l'éprouvette avant de charger l'éprouvette en compression.



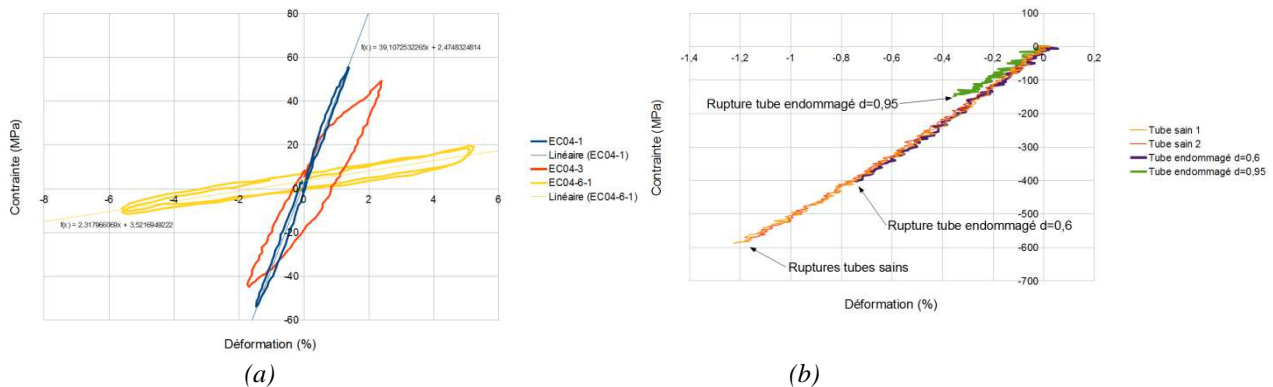


Fig. 9. Essais de torsion-compression sur éprouvettes saines et endommagées : (a) visualisation et mesure de l'endommagement sur un cycle de torsion (b) compression jusqu'à rupture

La sollicitation en compression permet ensuite de déduire la déformation atteinte lorsque la rupture en compression apparaît pour différents niveaux d'endommagement. Il est néanmoins difficile de conclure sur l'origine de cette rupture (flambage ou rupture matériau). On distingue que plus l'endommagement est important plus cette déformation est faible (fig. 10). Pour le comportement en traction [1], il a été montré que l'endommagement n'avait pas d'influence pour des valeurs relativement faible (jusque  $d=0,8$ ). Cependant en compression, on a bien montré que même pour des endommagements faibles la déformation avant rupture avait diminué.

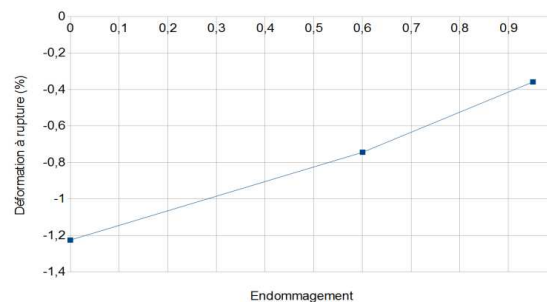


Fig. 10. Évolution de la déformation à rupture sens fibre en fonction de l'endommagement transverse

#### 4. Conclusion

Les essais présentés dans ce papier tendent à montrer que l'endommagement transverse abaisse la déformation atteinte avant la rupture en compression sens fibre pour les composites tissés carbone/époxy. Dans un premier temps, on a étudié le comportement du matériau en compression à travers un essai de flexion pure afin de s'affranchir au mieux de tout phénomène d'instabilité, indissociable des essais de compression. Un tel montage a permis une identification efficace du modèle de comportement en compression. Le défaut de cet essai reste la difficulté pour endommager au préalable les éprouvettes, c'est pour cette raison qu'un essai complémentaire sur tubes, sollicités en torsion-compression, a été mis en place.

Un premier essai sur éprouvettes saines a permis de montrer que le comportement, identifié en flexion pure, offrait une bonne cohérence avec les essais de compression. Néanmoins une différence notable a été observée concernant la déformation à rupture sens fibre. Deux causes sont avancées pour expliquer cette différence. Premièrement la structure tube peut présenter une charge critique de flambage plus faible que celle déterminée par simulation, ce qui est la conséquence des imperfections géométriques de l'éprouvette et de la non-linéarité du matériau. Deuxièmement, le gradient de déformation dans l'éprouvette peut jouer un rôle tel qu'il abaisse significativement la

déformation à rupture du pli [13-16]. Des essais complémentaires sur éprouvettes endommagées ont permis de montrer que l'endommagement transverse abaissait la déformation à rupture en compression sens fibre même pour des valeurs d'endommagement faibles. Ces résultats sont en accord avec les modèles micro [22] introduisant le mode de rupture lié aux bandes de glissement dont l'un des paramètres prépondérant est la rigidité de la matrice. Ces essais sur tubes n'ont cependant pas permis d'écarter le risque d'une rupture par flambage. C'est pour cette raison que nous travaillons actuellement d'une part sur un montage en flexion pure qui permettra d'endommager les éprouvettes au préalable et d'autre part sur une modification de la géométrie des tubes afin de s'affranchir des phénomènes d'instabilités.

## Références

- [1] Y. Thollon « *Étude du comportement à rupture des composites stratifiés constitués de plis tissés sous chargement statique et de fatigue* ». Thèse de doctorat, Université de Provence, 2009.
- [2] A.G. Gibson, M.E. Otheguy Torres, T.N.A. Browne, S. Feih, A.P. Mouritz « *High temperature and fire behaviour of continuous glass fibre/polypropylene laminates* ». Composites : Part A, Vol. 41, pp. 1219-1231, 2010.
- [3] T.J. Vogler, S.Y. Hsu, S. Kyriakides « *On the initiation and growth of kink bands in fiber composites. Part II: analysis* ». International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 2653-2682, 2001.
- [4] P. Ladevèze, E. Le Dantec « *Damage modelling of the elementary ply for laminated composites* ». Composites Science and Technology, Vol. 43, pp. 257-267, 1992.
- [5] N. Feld, O. Allix, E. Baranger, J.M. Guimard « *A micromechanics-based mesomodel for unidirectional laminates in compression* ». Proceedings of the 3rd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites, pp. 61-68, 2011.
- [6] J. Lee, C. Soutis « *A study on the compressive strength of thick carbon fibre-epoxy laminates* », Composites Science and Technology, Volume 67 (10), 2015 -2026.
- [7] O. Montagnier, C. Hochard « *Compression Characterization of High-modulus carbon fibers* ». Journal of composite materials, 2005
- [8] A. Jumahat, C. Soutis, F.R. Jones, A. Hodzic « *Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened* », Composite Structures, Volume 92 (10), 295 -305
- [9] S. Drapier, L. Daridon, and J.-C. Grandidier « *INFLUENCE OF SOME STRUCTURAL PARAMETERS ON BOTH THEORETICAL AND EXPERIMENTAL COMPRESSIVE STRENGTH OF LAMINATES* ».
- [10] Mahmood M. Shokrieh, Majid Jamal Omid « *Compressive response of glass-fiber reinforced polymeric composites to increasing compressive strain rates* ». Composite Structures, Vol. 89, pp. 517-523, 2009.
- [11] N. A. Fleck, P. M. Jelf, P. T. Curtis « *Compressive failure of laminated and woven Composites* ». journal of Composites Technology & Research, 1995.
- [12] N. Carbajal, F. Mujika « *Determination of compressive strength of unidirectional composites by three-point bending tests* ». Polymer Testing , Vol. 28, pp. 150-156, 2009.
- [13] J.-C. Grandidier, P. Casari, C. Jochum « *A fibre direction compressive failure criterion for long fibre laminates at ply scale, including stacking sequence and laminate thickness effects* ». Composite Structures, Vol. 94, pp. 3799-3806, 2012.
- [14] P. Ladeveze, Y. Remond, E. Vittecoq « *Essais mécaniques sur composites à hautes performances : difficultés et critères de validité* ». Bulletin S.F.M. 1989.
- [15] N.V. De Carvalho, S.T. Pinho, P. Robinson « *An experimental study of failure initiation and propagation in 2D woven composites under compression* ». Composites Science and Technology, Vol. 71, pp. 1316-1325, 2011.
- [16] M. R. Wisnom, J. W. Atkinson « *Constrained buckling tests show increasing compressive strain to failure with increasing strain gradient* ». Composites Part A, Vol. 28, pp. 959-964, 1997.
- [17] S. Miot « *Rupture de structures composites stratifiées sous chargements statique et de fatigue* ». Thèse de doctorat, Université de Provence, 2009.
- [18] C. Hochard, P.A. Aubourg and J.-P. Charles « *Modelling of the mechanical behaviour of woven-fabric CFRP laminates up to failure* ». Composites Science and Technology, Vol. 61, pp. 221-230, 2000.
- [19] E. Vittecoq « *Comparison between compression and tension behaviors of composites laminates* ». Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1991.
- [20] P. Ladeveze, E. LeDantec « *Damage modelling of the elementary ply for laminated composites* ». Composites Science and Technology, Volume 43, Issue 3, 1992, Pages 257–267
- [21] EVER J. BARBERO, JOHN TOMBLIN « *A DAMAGE MECHANICS MODEL FOR COMPRESSION STRENGTH OF COMPOSITES* ». Int. J. Solids Structures Vol. 33, No. 29, pp. 4379-4393, 1996
- [22] S. KYRIAKIDES, R. ARSECULERATNE, E. J. PERRY, K. M. LIECHTI « *ON THE COMPRESSIVE FAILURE OF FIBER REINFORCED COMPOSITES* ». Inf. J. Sol& Strucrurrs Vol. 32, No. 617. pp. 689-738, 1995
- [23] S. Pansart, M. Sinapius, U. Gabbert « *A comprehensive explanation of compression strength differences between various CFRP materials: Micro-meso model, predictions, parameter studies* ». Composites: Part A 40 (2009) 376–387